

II-59

急勾配混合砂礫水路における中規模河床波
と流砂量に関する実験的研究

北海道大学工学部 ○学生会員 目黒 嗣樹
北海道大学大学院 正会員 長谷川和義
同上 学生会員 藤田 豊彦
水資源開発公団 正会員 竜澤 宏昌

1 : はじめに

近年、自然環境への関心の高まりや、流域開発の上流への広がりなどから、山地河川においても環境保全の技術や、近自然的な淵と瀬の復元、創造技術などが模索されるようになってきた。このため、山地河川の河床形態、流れ、土砂流出について明らかにすることが必要不可欠となっている。

山地河川の河床形態は、谷幅の数倍規模の波長をもつ大規模河床波、流路幅の数倍の波長をもつ中規模河床波、水深の数倍の波長をもち階段状の形態を有する小規模河床波の3つに分類される。そのうち、「礫列(リップ)」、「礫段(ステップ・プール)」と呼ばれる2種類の小規模河床波については研究が進んでおり、その成因、性質が明らかにされてきた¹⁾。また、既往の実河川の観測結果によって見い出された小規模河床波と中規模河床波の重量が、最近、長谷川ら²⁾³⁾によって実験的に再現された。その中で、山地河川の中規模河床形態の1つは、沖積河川の交互砂州と同一の性質を示す砂礫堆であることが明らかにされている。しかし、中規模河床波を対象とした研究例は少なく、その成因や性質については明らかにされていない点が多い。

本研究は、次節に述べる方法によって流量・勾配を種々に変えた急勾配混合砂礫床流れの実験について報告するものであり、発生した性質の異なる中規模河床波の詳細な結果および流砂量の流出特性が示されている。

2 : 実験方法

実験には、長さ11(m)、幅0.3(m)、の両面アクリル板製可変勾配式循環水路を用いた。使用砂礫は、図-1に示すような、タルボット型の粒度分布、 $P = (d/d_{max})^n$ (P : 粒径 d の砂礫の通過重

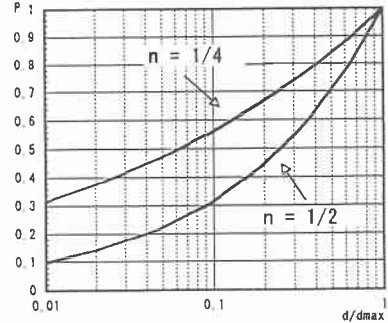


図-1 タルボット分布に従う粒度分布

量比率、 d_{max} :最大粒径)に従い、最大粒径5.0 (cm)、最小粒径0.1 (cm)で、べき数が $n=1/4$ の粒度分布を有する混合砂礫である。小規模河床波が形成されて安定化した河床表層は、アーミングの進んだ結果、同式で、べき数が $n=1/2$ の分布を有することが多い。今回の実験は、分級が十分起こりうるように砂の割合を多くしている。このような材料を20 (cm)の厚さに敷き詰めて水締めを行い、砂礫面をフラットな状態に均し、無給砂の条件で通水した。なお、通水は実験終了と同時に遮断した。最近の長谷川・藤田⁴⁾⁵⁾の研究によれば、混合砂礫床流れの線形不安定解析の結果からは、2つの有意な解が得られる。その一方は、一様砂の移動床流れにおける河床不安定と同様な解と考えられ、他方は混合砂礫によって生じる分級不安定を表す解と考えられる。これらの2つの解の関係は、与える水理量によって様々に変化する。本研究では、山地河川の勾配を想定して1/10と1/15の2ケースの勾配を設定し、各勾配ごとに前述の線形不安定解析の結果において、河床不安定が十分現れるような流量を見い出した。それから流量を段階的に増加させた、各4ケースを設定することにした。

実験条件の概略を表-1の左側に示す。

Experiments of meso-scale bed forms in a steep channel with heterogeneous bed materials

by Hideki MEGURO, Kazuyoshi HASEGAWA, Toyohiko FUJITA, Hiromasa TATUZAWA

実験名	実験条件								実験結果					
	勾配	流量 (l/s)	H_0 (m)	Fr	τ_*		q_0 (m ² /s)	通水時間 (分)	H_0 (m)	q_0 (m ² /s)	中規模河床波		小規模河床波 の有無	
					d_m	d_{max}					有無	波長(cm)		波高(cm)
BH-1	1/10	4.0	0.027	0.96	0.164	0.033	0.00180	8	0.025	0.00099	○	221.7	9	○
BH-2	1/10	6.0	0.032	1.12	0.194	0.039	0.00281	9	0.026	0.00145	○	246.6	7.6	×
BH-3	1/10	7.7	0.036	1.20	0.218	0.044	0.00368	3.5	0.038	0.00189	△	131.7	-	×
BH-4	1/10	10.2	0.041	1.31	0.248	0.050	0.00493	3.3	0.046	0.00346	△	161.7	-	×
BH-9	1/15	6.0	0.035	0.97	0.107	0.021	0.00141	20	0.032	0.00083	○	270.0	5.68	○
BH-10	1/15	7.3	0.039	1.03	0.117	0.023	0.00176	16	0.034	0.00110	○	280.0	5.27	×
BH-11	1/15	9.0	0.042	1.09	0.129	0.026	0.00221	5	0.039	0.00154	▲	160.0	-	×
BH-12	1/15	10.6	0.046	1.14	0.139	0.028	0.00265	5	0.038	0.00186	▲	165.0	-	×

表-1 実験条件と実験結果の概略

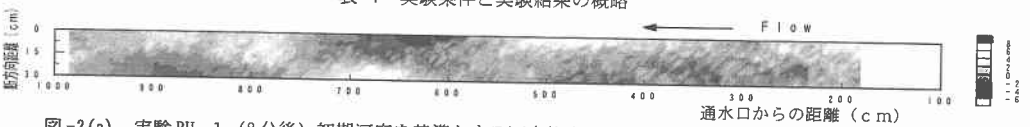


図-2(a) 実験BH-1 (8分後) 初期河床を基準とする河床等高図 (局所河床勾配高差し引き)

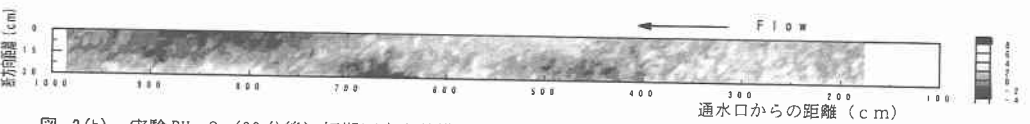


図-2(b) 実験BH-9 (20分後) 初期河床を基準とする河床等高図 (局所河床勾配高差し引き)

3 : 実験結果

(1) 概略

実験結果の概略を表-1の右側に示す。 H_0 は初期平均水深を表し、今回の実験では砂礫の頂部より平均粒径($d_s=1\text{cm}$)の0.25倍下を理論河床とした。流砂量 q_0 は通水開始1分後に流路末端で計測したものである。中規模河床波の有無に関しては、○は砂礫堆が形成されたこと、△は縦横断交互分級波が形成されたこと、▲は上流の1部を除いて△と同じ形態が形成されたことを示す。また、波長は、砂礫堆については、各砂礫堆長を平均を示し、縦横断交互分級波が形成されたケースについては、形態が縦横断方向にいれかわる半波長の平均をもって示した。波高は、砂礫堆ごとに左右岸端で最も高いところと低いところの差をとって平均したものを示す。以下に、個々の実験結果について詳細に述べる事にする。

(2) 砂礫堆が形成された実験

a) RunBH-1

通水開始からまもなくして水流が蛇行し、通水1分後には、砂礫堆が形成されて水面より上方に現れてきた。その砂礫堆の位置は通水終了まで変化しなかった。次いで上流側から小規模河床波が順に形成されてきた。通水8分後では通水口から600(cm)まで小規模河床波が形成された。図-2(a)に、このときの河床等高図(局所河

床勾配高差し引き)を示した。この図から3つの砂礫堆が形成され、蛇行が生じたことがわかる。また、図-3(a)に右岸、左岸からそれぞれ3,6,9(cm)の地点の河床高を平均した左右岸の高低差を比較したものを示す。(以下、左右岸の河床等高図は同様に示すことにする。)この図からも非常に高い波高の砂礫堆が形成されたことがわかる。

b) RunBH-2

通水開始2~3分後に水流が蛇行し始め、それとほぼ同時期に砂礫堆が水面よりも上方に現れた。しかし、この砂礫堆はすぐに破壊され水面下に隠れた。その後、砂礫堆は何度か崩壊と形成を繰り返した。しばらくして、上流の砂礫堆から順に水面上に現れ、その位置が安定化し、通水8分後には、水路全体が安定化した。しかし水みち部では掃流力が大きいためか大きい礫が停止せず、小規模河床波が形成されることはなかった。このときの左右岸の河床等高図を図3-(b)に示した。この図より非常に高い波高の3つの砂礫堆が形成されたことがわかる。

c) RunBH-9

通水1分後から水流の蛇行する様子が観察できたが、顕著な波高はまだ現れなかった。5分後には、1部の砂礫堆が水面より上方に現れ、砂礫堆の位置が安定化した。それとほぼ同時期に上流から順に小規模波が形成されてきた。通水20分後の河床は、水みち部全体が小規模河床波で覆われていた。砂礫堆が水面に現れて、その位置

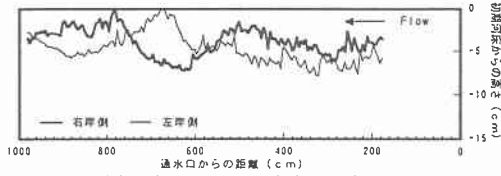


図-3(a) 実験BH-1の左右岸の河床高図
(平均勾配差し引き)

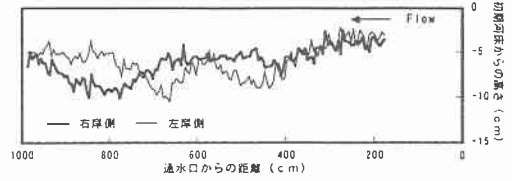


図-3(c) 実験BH-9の左右岸の河床高図
(平均勾配差し引き)

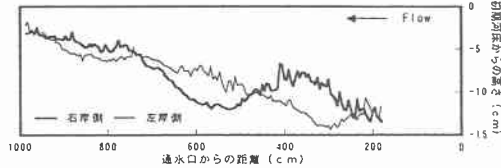


図-3(b) 実験BH-2の左右岸の河床高図
(平均勾配差し引き)

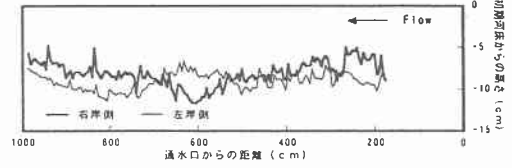


図-3(d) 実験BH-10の左右岸の河床高図
(平均勾配差し引き)

が安定化した後の現象は、BH-1とよく似ている。図2-(b)、図3-(c)は、それぞれ通水20分後の河床等高図と左右岸の河床高図を示す。この2つの図から通水口から500～600(cm)付近で、左右岸でほぼ同じ高さを有する部分が生じているが、ここで水流は入れかわることなく左岸側を流れていた。したがって通水口から430～700(cm)を1つの砂礫堆とみなすと、2つの砂礫堆が形成されたことがわかる。

d) RunBH-10

通水2分後から水流の蛇行が観察され、続いて砂礫堆の1部が水面より上方に現れた。通水5分後には、砂礫堆は崩れて水面下に隠れた。砂礫堆が形成され崩壊するのは、BH-2に似ているが、BH-2のように砂礫堆の形成と崩壊を何度も繰り返すことはなかった。通水10分後には砂礫堆は水面下に隠れているものの砂礫堆が崩壊する様子はなく、その位置は安定しているようだった。また、通水終了時(通水16分)までに小規模波が形成されることはなかった。図3-(d)に通水16分後の左右岸河床高図を示す。この図から左右岸の高さが入れかわって、3つの砂礫堆が形成されたことがわかる。

(2) 縦横断交互分級波が形成された実験

e) RunBH-12

水流は、流路幅でほぼ一様に流れているようだった。時折、流路方向の左右交互に若干流れが変化する様子が観察されたものの、砂礫堆が形成する場合ほど明確になることはなかった。通水3分後には、通水口から300(cm)付近までは、

最大粒径程度の砂礫の動きが鈍くなってきたが、それよりも下流側では活発に流れつづけた。通水終了後(5分後)の下流側の河床表面には、礫の集まる部分とほとんど礫がない部分とが形成されていた。その様子は、写真-1より確認することができる。図-4の河床等高図、図-6の左右岸河床高図から左右岸の高低差がほとんどなく砂礫堆が形成されていないことがわかる。図-5は、図-4に示した位置の河床表層3(cm)程度を採取し、その粒度分布を測定したものである。これより礫の集まった部分は、元河床より若干粗く、その対岸は、砂の割合が多くなり細くなっていたことがわかる。図-7は、右岸、左岸からそれぞれ3, 6, 9(cm)、縦断方向に前後20(cm)の帯を考え、その地点での河床高の平均河床高からの差に関する分散値をとって左岸・右岸で比較したものである。この図より、礫の集まった部分の分散値が対岸よりも高くなっていて、左右岸で分散値が入れかわっていることがわかる。また、この河床表面の粗度が縦横断交互に異なっていることがわかる。さらに、砂分の多い方の分散値が非常に低いことから、この部分がほぼ平らであったこともわかる。

f) RunBH-11

通水開始後はほぼ一樣な水流であったが、通水2分後から水路の所々で最大粒径程度の礫が停止するのが確認でき、通水口付近に左右岸で1～2(cm)の高低差が生じて水流が蛇行する様子が見られた。この様子は、図-8(上)からもわかる。しかし、通水終了後(5分後)の河床表面には縦横断交互にBH-12のような礫が集まった部分と

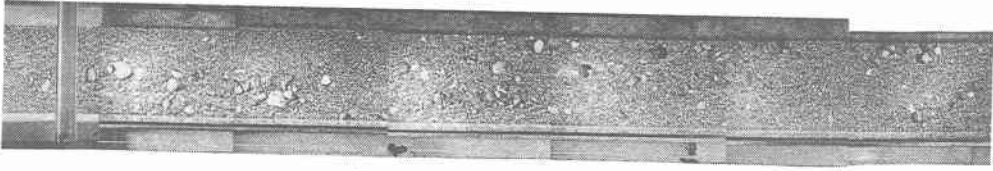


写真-1 実験BH-12 実験後の河床

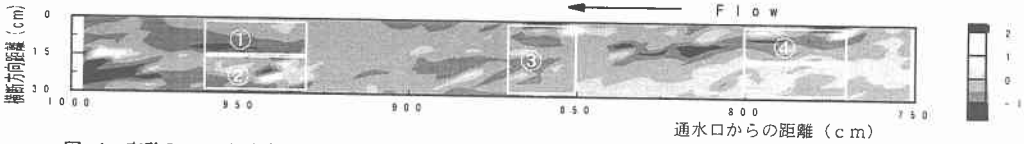


図-4 実験BH-12 (5分後) 初期河床を基準とする河床等高図 (局所河床勾配高差し引き)

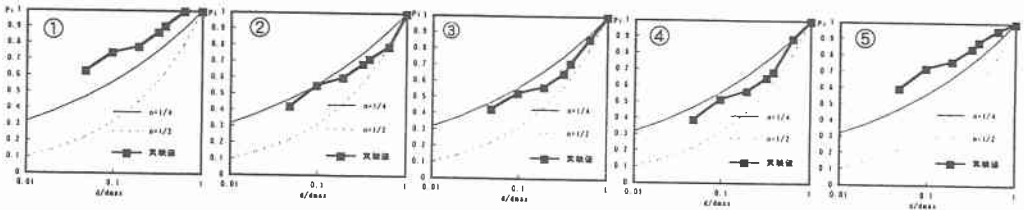


図-5 実験BH-12 河床表層のフレイ分けの結果

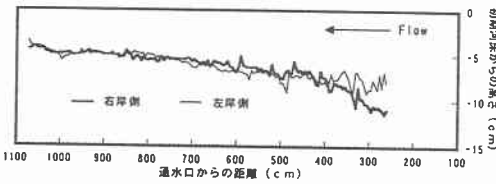


図-6 実験BH-12の左右岸の河床高図 (平均勾配差し引き)

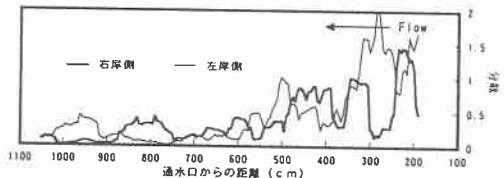


図-7 実験BH-12の左右岸の分散

集まっていない部分とがみられた。図-8(下)は、図-7と同様にして右岸・左岸からそれぞれ3, 6, 9 (cm)、縦断方向に前後35 (cm)の帯を考え、その地点の河床高の分散値をとったものである。ここでも左右岸で分散値の左右岸でのいれかわりがみられたことから、縦横断方向に交互に砂礫の分級が進行していることが確認できる。

g) RunBH-3

通水終了まで水流が蛇行する様子はなく、砂礫は勢よく流れた。通水中に波高が生じる様子もなかった。しかし通水終了後(3.5分後)の河床表面はBH-12と同様な縦横断交互に礫の集まる部分が見られた。図-9(上)に見られるように左右岸での高低差はほとんどない。図-9(下)は、図-8(下)と同様にして分散値をとったものである。BH-11, 12と同様にして左右岸でのいれかわりをみることができることから、これも縦横断方向に粗度の違う河床形態が形成さ

れたことがわかる。

h) RunBH-4

水流・砂礫ともに勢よく流れた。蛇行や砂礫が止まる様子はなかった。通水終了後(3.3分後)の河床は、左右岸での高低差がほとんどなかった。また、BH-3, 11, 12ほど明確ではないものの礫が流路に沿って交互に集まっているのが見られた。図-10(上)からは、波高がほとんどない様子が、図-10(下)からは左右岸での分散値が入れかわり、縦横断に粗度の違う河床形態が形成されたことがわかる。

4: 流砂量

(1) 実験値と流砂量式との比較

図-11は、通水1分後に流路末端で計測した実験値と流砂量式との比較を表したものである。流砂量式には、芦田・道上式に斜面効果の修正を加

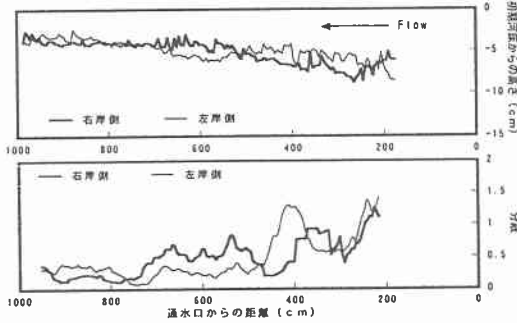


図-8 (上) 実験 BH-11 の左右岸の河床高図 (平均勾配差し引き) と(下) 左右岸の分散

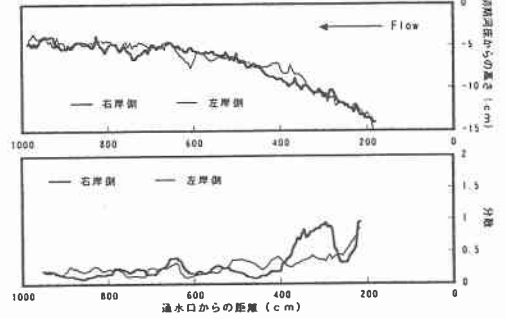


図-10 (上) 実験 BH-4 の左右岸の河床高図 (平均勾配差し引き) と(下) 左右岸の分散

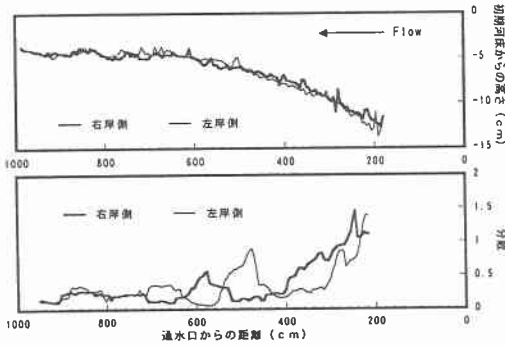


図-9 (上) 実験 BH-3 の左右岸の河床高図 (平均勾配差し引き) と(下) 左右岸の分散

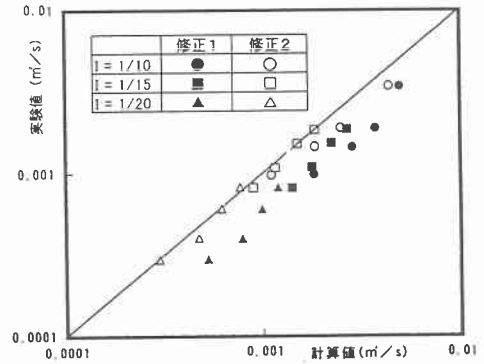


図-11 流量の実験値と計算値の比較

えた式(1)、平均粒径に対する限界掃流力式には、Graf・Suszkaの経験式(2)、粒径別限界掃流力には、平野によるEgiazaroff式修正式(3)を採用した。

$$q_{xi} = \frac{17}{\cos\theta} \tau_{ci}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{ci}}{\tau_{ci}}\right) \times \quad (1)$$

$$\left(1 - \sqrt{\frac{\mu_k \tau_{ci} \cos\theta}{\mu_s \tau_{ci}}} + \frac{1}{\mu_k} \left(\tan\theta - \frac{\partial\eta}{\partial x}\right)\right) \sqrt{sgd^3 p_i}$$

$$\tau_{cm} = 0.042 \cdot \exp(5.06 \cdot I) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau_{ci} = \left[\frac{\text{Log}(19)}{\text{Log}(19d_i/d_m)} \right]^2 \tau_{cm} & (d_i/d_m > 0.4) \\ \tau_{ci} = 0.85 \frac{d_m}{d_i} \tau_{cm} & (d_i/d_m < 0.4) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 p :各粒径 d の体積存在割合、 q_x :縦断方向単位幅単位時間流砂量、 τ_{ci} :無次元限界掃流力、 τ_{ci} :無次元掃流力、 μ_s :クーロン静止摩

擦係数($\mu_s = 1.0$ とした)、 μ_k :クーロン動摩擦係数、 s :砂礫の水中比重($s = 1.65$ とした)、 I :勾配、であり、サフィックスの i は粒径の分割クラス番号を、 m は平均粒径に対応することをそれぞれ表わしている。、図-11での修正1は、式(1)の $\mu_k = 0.5$ と見積もった場合を意味し、修正2は、 $\mu_k = 1.0$ と見積もった場合に対応している。今回の実験では、修正2の方が実験値との適合性がよいようである。なお、図中には、 $I=1/20$ の追加実験の結果も載せている。

(2) 流砂の粒度分布

ここでは、河床形態を①:砂礫堆が形成され、かつ小規模河床波が形成されたもの、②:砂礫堆が形成されたが小規模河床波が形成されなかったもの、③:交互分級波がみられたもの、に分類しそれぞれで特徴的なものを例にあげて、時間経過ごとの流砂の粒度分布を比較する。なお、図-12中の●、▲、■の印は、それぞれのケースで通水後のそれぞれの総流砂量がほぼ等しくなった時間帯におけるものを選び、対応させて

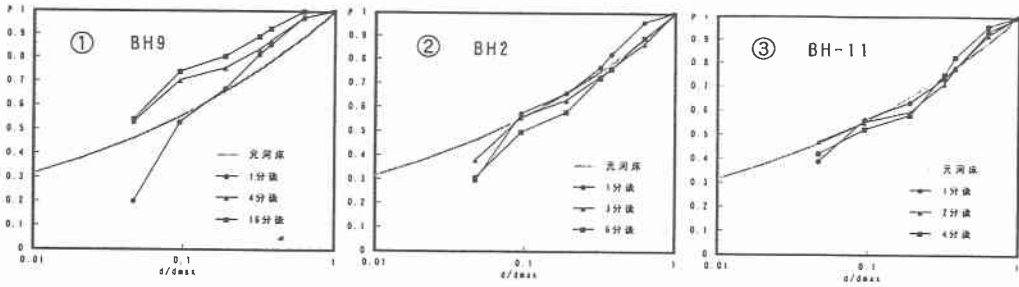


図-12 流砂の粒度分布の時間変化 (左から実験 BH-9、実験 BH-2、実験 BH-11)

表したものである。①には、BH-9を記載した。この図から、粒度分布が時間とともに細くなっていくのがわかる。これは、砂礫堆が形成され、その上に小規模河床波が重なって河床波が安定化したためと考えられる。②には、BH-2を記載した。この図からは、ほぼ元河床と同じ粒度分布をもつ流砂が続いたことがわかる。若干粗くなる方向に変動している。これは、砂礫堆の形成と崩壊が繰り返されたことと関係しているものと考えられる。③には、BH-11を記載してある。この図でも、ほぼ元河床の粒度分布と同じ分布を有する砂礫が流れていたことがわかる。他のケースと比較しても、元河床の粒度分布からの変動は極めて少ない。交互分級波が形成される流れにおいては、水流・砂礫の両者が水路幅方向に、ほぼ一様に流れており、その結果が現れたものと解釈できる。

5: まとめ

今回の実験結果をまとめると次のようになる。

1) 所定の急勾配混合砂礫河床においては、流量変化にともなって河床形態が大きく変化し、それらは2つに大別できる。一方は、従来から報告されている高い波高と理論波長(0.8~1.0m)の3倍程度の長い波長を有する砂礫堆である。他方は、礫一層程度の波高と、やや長い波長を有する縦横断交互に礫が寄り集まった形態である。

2) このうち縦横断に礫が寄り集まった形態は、左右岸での高低差がほとんどなく、礫の集まった方が対岸よりも相対的に高くなっていて、その対岸は、砂分が多くほぼ平らになっており、河床の粗度に違いを生じている。この形態は、その特徴と波長が分級波理論波長(1.3~1.5m)に、ほぼ一致することから、分級作用によって生じる縦断方向交互分級波であると考えられる。しか

し、その形成機構については不明な点が多い。

3) 通水初期の流砂量は、縦断勾配効果を加味した芦田・道上式に Graf・Suszuka の限界掃流力式、Egiazaroff の粒径別限界掃流力式を適用した式でかなり良好に説明される。

4) 砂礫堆形成実験における流砂量の粒度分布は、砂礫堆の移動が停止するまでは、変動が生じ、停止後は細粒化する方向に移る。小規模河床波が形成されるとさらに細くなる。また、縦横断方向交互分級波が形成した実験では、流砂の粒度分布は、ほぼ元河床の粒度分布を維持し続けるようである。このように、生じる河床形態によって流砂の粒度分布が変化する。

参考文献

- 1) 長谷川和義: 溪流の淵・瀬の水理とその応用、1997年度(第33回)水工学に関する夏季研修会テキスト、pp. A-9-1~A-9-20, 1997.
- 2) 長谷川和義・藤田豊彦・林日出喜・竜澤宏昌・森高信: 山地河川に見られる中規模・小規模共存河床形態の実験的検証、水工学論文集、第43巻、pp. 749-754, 1999.
- 3) 竜澤宏昌・林日出喜・森高信・長谷川和義・藤田豊彦: 高水理条件下における小規模河床波(礫列・礫段)の形成と形状特性、水工学論文集、第43巻、pp. 731-736, 1999.
- 4) Fujita, T., H. Tazawa and K. Hasegawa: Experimental reproduction and analyses of medium-scale bedforms in mountain rivers, IAHR Symposium on RIVER, COASTAL AND ESTUARINE MORPHODYNAMICS, Proceedings-Volume 1, pp. 273-282, 1999.
- 5) 長谷川和義・藤田豊彦・目黒剛樹・竜澤宏昌: 河床不安定および分級不安定をともなう急勾配混合砂礫河床の形態、水工学論文集、第44巻、(投稿中)